

SZÁLAS SZERKEZETEK ÉS SZÁLERŐSÍTETT KOMPOZITOK STATISZTIKUS SZERKEZETI-SZILÁRDSÁGI MODELLEZÉSE ÉS KOMPLEX VIZSGÁLATA OTKA K 049069

Szakmai beszámoló (2005-2008)

1. BEVEZETÉS

A szál as szerkezetek, mint a textilanyagok, szálerősített kompozitok, sőt a lineáris polimerek is, diszkrét szálszerű elemekből, illetve polimer láncokból épülnek fel. A statisztikus szilárdsági tulajdonságokkal jellemezhető szálak alakja és orientációja általában, vagy legalábbis részben véletlenszerű és mechanikai terhelés esetén a az alakváltozásuk a környezettel való kapcsolatuktól is függ. A szomszédos, vagy valamilyen kapcsolatban álló szálak, az ún. szálkötegek, sajátos csoport-, vagy kötegviselkedést mutatnak, pl. a szerkezet tönkremenetelénél. E jelenséget felismerve, különböző szemléletű szálköteg elméleteket dolgoztak ki, főleg valamely szilárdsági jellemző eloszlására, vagy a károsodási valószínűsége, illetve mérethatásokra fókuszálva. E területen elsősorban H.D. Daniels [1], D.G. Harlow [2], és főleg S.L. Phoenix [2, 3] munkái emelendők ki.

Ezen eredményekre alapozva alakult ki az elképzelés, miszerint a szál as szerkezetű anyagok, illetve a belőlük kivágott minták mechanikai vizsgálati folyamatai (pl. húzó-, hajlító-, csavaróvizsgálat), illetve azok statisztikus szerkezeti és szilárdsági jellemzői, bizonyos idealizált statisztikus szálkötegek, mint modellelemek segítségével modellezhetők.

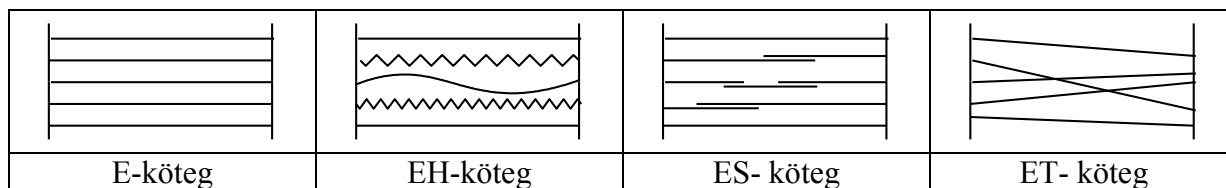
E koncepció alapjait az OTKA I/3 T821 (1991-1994), T038220 (2001-2004) [4,5,8,9], míg az egyes alkalmazásokhoz kapcsolódó statisztikus szálpaplan modellt az OTKA T022077 (1997-1999) [6,7] témaszámú kutatások során dolgoztuk ki. A modell kidolgozása és ellenőrzése számos, a modellezendő szál as szerkezetek vonatkozó szerkezeti és mechanikai tulajdonságait feltáró kísérleti eredményre támaszkodott, amelyekhez megfelelő próbatest gyártási technológiákra és – helyenként újszerű – mérési eljárások kifejlesztésére volt szükség.

A következőkben röviden összefoglaljuk a szálköteg-modellezés előzményekben kidolgozott alapelveit, majd ismertetjük a jelen kutatás keretében elért eredményeket.

2. ELŐZMÉNYEK - SZÁLKÖTEGCELLÁKRA ALAPÍTOTT MODELLEZÉSI MÓDSZER

Statisztikus szálkötegcellák

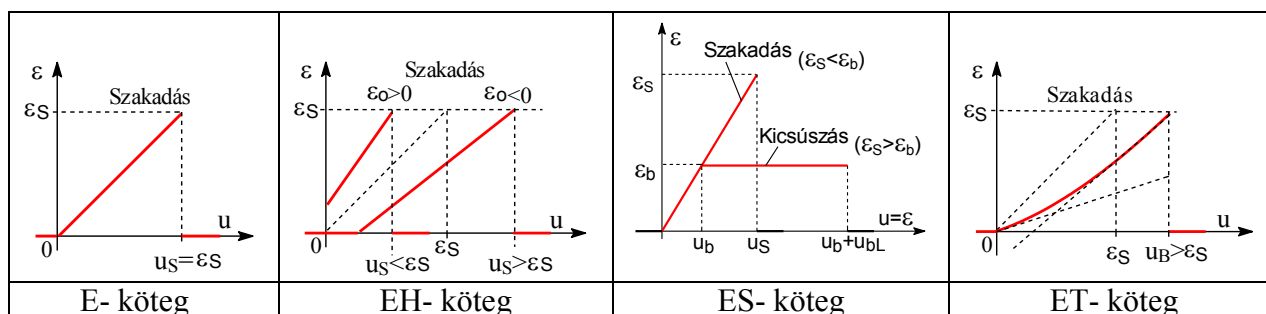
Egy szál as szerkezet szálai osztályozhatók a geometriai (alak, helyzet) és mechanikai (nyúlásállapot, környezeti befogás) jellemzői szerint. Ezen szálosztályok szálkötegcelláknak SKC) nevezhetők (1. ábra).



1. ábra. Idealizált szálkötegcellák szerkezeti vázlata

Ezen SKC-k szálai tökéletesen hajlékonyak, húzásra lineárisan rugalmasak ($E =$ elasztikusok) és egy véletlen szakítónyúlás értéknél ($\varepsilon_S > 0$) elszakadnak. Egyenesek és a húzásiránnyal párhuzamosak az E-kötegben, lazák (hullámosak, $-1 < \varepsilon_0 < 0$) vagy előfeszítettek ($\varepsilon_0 > 0$) az EH-kötegben, valamint ferdek (irányszög $\alpha \neq 0$) az ET-kötegben, és ideális befogásúak ezen esetekben [4,5,8,9]. Az ES-köteg szálai egyenesek, azonban egy bizonyos $\varepsilon_b > 0$ nyúlásértéknél ($\varepsilon_b < \varepsilon_S$) megcsúszhatnak és kicsúszhatnak a környezetük adta befogásból vagy megcsúszó kötészű szálláncot alkotva, a százelemek szétszúszhatnak. Az ES köteg esetében ε_{bL} a szálak relatív kicsúszási úthossza, amelynek elérése után az adott szál, vagy szállánc erőkövetítése megszakad. Amennyiben a kicsúszási határ nagyobb az adott szál szakadási nyúlásánál ($\varepsilon_b \geq \varepsilon_S$), a szál elszakad. A szálak alak-, helyzeti-, és szilárdsági paraméterei független sztochasztikus változók.

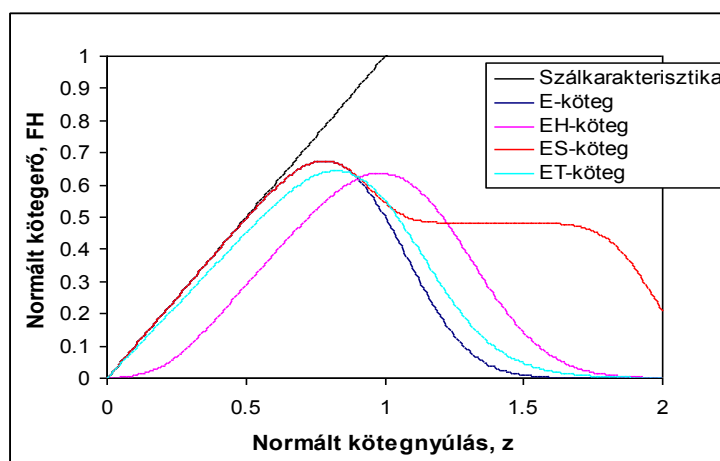
Az ilyen szálkötegcellák állandó nyúlássebességű húzóvizsgálat során a húzóerő ($F(u)$) sztochasztikus folyamatot alkot a relatív nyúlás (u) függvényében. Ismerve a szálköteg nyúlása (u) és az egyes szálak nyúlása (ε) közötti, a környezeti kapcsolatokat és az egyes tönkremeneteli lehetőségeket is leíró összefüggéseket (2. ábra), az SKC-k várható húzóerőfolyamata ($E(F) = \bar{F}$) az egyes szálak várható húzóerőfolyamatai összegeként számítható a megfelelő, kidolgozott formulák alkalmazásával [4,5,8,9].



2. ábra. A kötegnyúlás és a szálnyúlás közötti összefüggés

A várható köteghúzóerőt a szálak n számával és F_S várható szakítóerejével, a kötegnyúlást a szálak ε_S várható szakító nyúlásával normálva kapjuk az $FH(z)$ normált húzóerőfolyamatot, amelynek az egyes szálkötegcellákat illető tipikus alakjait a 3. ábra mutatja be:

$$0 < FH(z) = F(z) / nF_S \leq 1, \quad z = u / \varepsilon_S \quad (1)$$

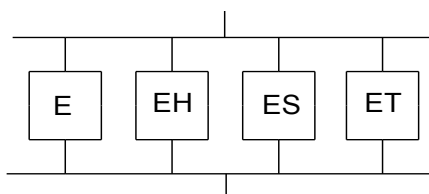


3. ábra. Szálkötegcellák tipikus normált várható húzóerő – normált nyúlás görbéi

A várható húzóerő-folyamattal kiszámításához bevezettük a működési intervallumokhoz definiált ablakfüggvények módszerét, amellyel szorzat alakban szétválaszthatóvá vált a rugalmas viselkedést leíró karakterisztika és a tönkremenetelt jellemző paraméterek hatása.

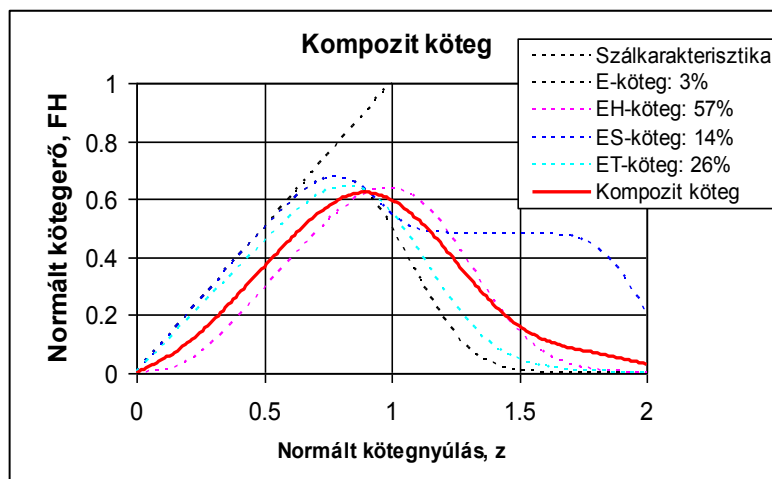
A 3. ábra jól szemlélteti, hogy a SKC-k – a szakítógörbéket illetően – meglehetősen bonyolult, de gyakran észlelt mechanikai viselkedéseket, mint a hullámos szálak okozta kezdeti alulról konvex görberész (EH-köteg), vagy az erőcsúcs utáni, meg- és kicsúszások generálta plató jelenléte (ES-köteg), jól modellezhetnek még önmagukban is. Általában azonban többféle SKC szükséges a valós szálak szerkezet mechanikai válaszának a modellezésére. A legtöbb esetben az SKC-k kompozit kötegnek nevezett párhuzamos kapcsolásával (4.a. ábra) megfelelő modellt állítható elő és az eredő várható érték folyamat a az egyes SKC válaszok szálszám arányokkal (S_k) súlyozott összegeként számítható:

$$FH(z) = \sum_{k=1}^4 S_k FH_k(z), \quad \sum_{k=1}^4 S_k = 1 \quad (2)$$



4. ábra Kompozit köteg, mint szálkötegcellák párhuzamos kapcsolása

Az 5. ábra a 3. ábrán látható normált várható húzóerő-nyúlás görbéikkel adott szálkötegcellák párhuzamos kapcsolása, mint kompozit köteg, adott súlyokkal számolt eredő görbéjét szemlélteti.



5. ábra. Párhuzamosan kapcsolt SKC-k normált várható húzóerő-nyúlás görbéje

A beszámolóban hivatkozott irodalom

- [1] Daniels, H.E.: The Statistical Theory of the Strength of Bundles of Threats. *Proceedings of the Royal Society of London*. Vol. A183. (1945) 405-435.
- [2] Harlow, D.G. & Phoenix, S.L.: The Chain-of-Bundles Probability Model For the Strength of Fibrous Materials I: Analysis and Conjectures. *Journal of Composite Materials* Vol.12. (1978) No.6. pp. 195-214. II: A Numerical Study of Convergence. Vol.12. (1978) No.7. 314-334.

- [3] Phoenix, S.L.: Statistical Models for the Tensile Strength of Yarns and Cables. In *Mechanics of Flexible Fiber Assemblies* (edited by Hearle J.W.S., Thwaites J.J., and Amirbayat J.) NATO Advanced Study Institutes Series. Series E: Applied Sciences – No. 38. Sijthoff & Nordhoff, Alphen aan de Rijn, The Netherlands; Germantown, ML. USA. (1980), 113-141.
- [4] Vas L.M.: Újabb eredmények a síkban rendezett szál- és fonalkötegek szakítási elméletében, Magyar Textiltechnika XLV(3), 71-75 (1992), XLV(5-6), 137-142 (1992), XLV(7-8), 187-191 (1992)
- [5] Vas L.M., Császi F.: Use of Composite-Bundle Theory to Predict Tensile Properties of Yarns, Journal of the Textile Institute 84(3), 448-463 (1993)
- [6] Vas L.M., Balogh K., Nagy P., Gaál J.: Üvegszálpaplan szerkezeti modellezése és vizsgálata, Magyar Textiltechnika LI, 67-71 (1998)
- [7] Vas L.M., Balogh K.: Testing fiber orientation and its effect on glass mats by using image processing system, VI. International Conference IMTEX'2000. Lodz, June 5-6, 2000. Proceedings edited by W. Wieslak, Scientific Bulletin of Lodz Technical University No.58. 69-78 (2000)
- [8] Vas, L.M., Rácz Zs.: Modeling and Testing the Fracture Process of Impregnated Carbon Fiber Roving Specimens During Bending Part I. Fiber Bundle Model. *Journal of Composite Materials* Vol.38. (2004) No.20., 1757-1785.
- [9] Vas, L.M., Rácz Zs., Nagy P.: Modeling and Testing the Fracture Process of Impregnated Carbon Fiber Roving Specimens During Bending Part II. Experimental Studies. Vol.38. (2004) No.20., 1787-1801.

3. AZ OTKA K049069 KUTATÁS SORÁN ELÉRT EREDMÉNYEK

A **kutatás célja** olyan, a szálfolyam és szálköteg elméletekre, a korábban kidolgozott eredményekre, valamint kísérleti és végeselemes vizsgálatok eredményeire alapozott **modellezési módszer és szoftver-háttér** kidolgozása, amely alkalmas a különböző szálak struktúrák (szálkötegek, szálszalagok, rovingok, fonalak, szálpaplanok, szövetek), unidirekcionális kompozitok, illetve laminált kompozit lapokból különböző irányokban kivágott próbatestek szerkezeti-geometriai és szilárdsági tulajdonságainak, a húzó-, csavaró-, illetve hajlítóvizsgálatok során végbemenő tönkremeneteli folyamatok elméleti becslésére és statisztikai jellemzésére. A kísérleti vizsgálatokhoz kapcsolódó **további célként** tűztük ki, egy olyan univerzális szakítógéppel és CCD kamerás képfeldolgozó, illetve akusztikus emissziós berendezéssel integrált, **komplex számítógépes vizsgáló és kiértékelő rendszer és módszer**, illetve **modellező szoftver** kifejlesztése, amely alkalmas az egyedi szálak, rovingok, szálerősített kompozit próbatestek statisztikus viselkedését, tönkremeneteli folyamatait és a mérőhatásokat tanulmányozni, elemezni és modellezni, mérnöki alkalmazású anyagmodelleket kialakítani.

A következőkben ezen célok elérése érdekében végzett elméleti és kísérleti kutató-fejlesztő munka eredményeit foglaljuk össze, ahol a vonatkozó megjelent publikációkra a *Zárójelentés közlemények* lista pl. 16. és 21. sorszámaival a [OTKAKözl. 16, 21] formában hivatkozunk.

3.1. MODELLEZÉSI MÓDSZEREK FEJLESZTÉSE

A modellezési módszerek fejlesztése körében elsősorban a célkitűzés fő pontjainak megfelelő szálkötegcella modellezés elméleti háttérének, eszközeinek és alkalmazásainak, valamint az ezekre épülő modellező szoftver fejlesztését, továbbá a modellezés fejlesztését

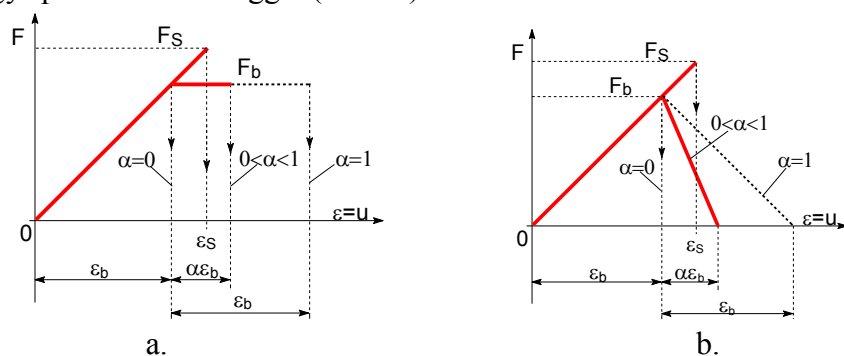
alapozó és segítő kísérleti eredmények értelmezéséhez hozzájáruló végeselemes modellek kidolgozását ismertetjük. A végeselemes modellek fejlesztése egyúttal elősegíti azon távlati cél megvalósítását is, hogy a szálkötegcellákat végeselemes anyagmodellként is alkalmazhassuk.

3.1.1. A szálkötegcella módszer és alkalmazásai fejlesztése

3.1.1.1. Egyirányú szálak szerkezetek, kompozitok húzószilárdsági jellemzői

A szálfolyamok elméletét [2,6] és az ún. keresztmetszeti-, a szakállhossz- és aktív szakállhossz-eloszlásokat felhasználva, az ES-köteg alkalmazásaként dolgoztuk ki az egyirányú szálak szerkezetek szerkezeti-szilárdsági modelljét húzóterhelés esetére, feltéve, hogy az átlagos szálhossz sokkal kisebb a terhelt szakasz hosszánál. Ennek során kidolgozott megoldások, elért részeredmények a következők [OTKAKözl. 12, 13, 19, 21, 22, 29, 33]:

(1) Kimutattuk, hogy egy egyirányú, a szálak között adhéziós kapcsolattal rendelkező szálfolyam húzóterhelése esetén a szakadási felületet, illetve keresztmetszetet metsző szálak kicsúsznak a többi szál adta befogásból, ha a keresztmetszet két felére eső szálhosszai, az ún. szakállhosszak minimuma kisebb a kritikus tapadási hosszánál, ellenkező esetben elszakad. A szakadási keresztmetszetet metsző szálak szálköteget alkotnak, így a rendszer terhelés alatti viselkedése, a deformációs és az egymást követő szálkicsúszások, szálszakadások folyamata jól leírható egy speciális ES köteggel (6. ábra).



6. ábra. ES1 (a) és ES2 (b) típusú szálkötegcellák szálainak húzóerő – kötegnyúlás összefüggése

Ehhez bevezettük az ES köteg ES1 és ES2 módosított formáit (6. ábra), amelyben a kicsúszási határ nem független a kicsúszási hosszától, mint ahogy ez az eredeti ES-kötegnél van, hanem ezeket szakállhosszak minimuma határozza meg. Az ES1 kötegnél a kicsúszási ellenállás állandó, míg az ES2 kötegnél lineárisan csökken egy α tényezővel adott kiszakadási határig (6. ábra). [OTKAKözl. 12, 19]

(2) Ennek segítségével meghatároztuk a várható húzóerő-folyamatot, illetve annak az erőmaximuma által definiált húzószilárdságnak az átlagos szálhossztól való függését különböző tönkremeneteli módok esetén. Egyrészt az irodalomban elterjedt szemléletű pillanatszerű, egyidejű kicsúszás-törés modellt, másrészt az ES1- és ES2-kötegek által modellezett tönkremeneteli módokat használtuk a fokozatos károsodás újszerű leírásához tetszőleges szálhossz-, illetve szálszakító nyúlás eloszlások és véletlen szálhúzó merevség mellett. Állandó szálszakító nyúlás, húzómerevség és szálszakító erő feltételezésével, állandó szálhossz és exponenciális szálhosszeloszlás eseteire meghatározott várható húzóerő-folyamatok alapján, egyszerű, a tárgyalt tönkremeneteli módok mindegyikére, azaz a pillanatszerű és egyidejű, valamint az ES1, illetve ES2 típusú tönkremeneteli módokra érvényes, analitikus formulákat vezettünk le az átlagos szakítószilárdság és az átlagos szálhossz összefüggésének leírására. Amennyiben a szálhossz relatív szórása 0 és 1 közé eső érték, úgy újszerű becslésként az állandó szálhosszra, illetve exponenciális

szálhosszeloszlásra kapott megoldások konvex lineáris kombinációjának alkalmazása javasolható. [OTKAKözl. 12, 19]

(3) Az eredmények gyakorlati alkalmazhatóságát PP szálak szakítószilárdsága és átlagos molekulatömege közötti összefüggés identifikációjával mutattuk be, ami további mérések nélkül lehetővé tette az effektív kritikus molekulatömegnek és a molekulaláncok effektív szilárdságának becslését. [OTKAKözl. 12, 19]

(4) A rövidszálú szálfolyamokra kapott eredmények alapján egyszerűen kezelhető formulákat vezettünk le az egyirányú, állandó hosszúságú szálakkal erősített kompozitok szilárdságának és a túl kicsi mátrixtartalom esetén fellépő tapadáscsökkenés hatásának becslésére. [OTKAKözl. 12] Ezen eredményeket Pölöskei K. doktorandusz, külső munkatárs is hasznosította 2006-ban megvédett PhD dolgozatában.

(5) Az állandó szálhosszú szálfolyamokra, illetve azok mátrixba ágyazott formájára kapott eredményekre alapozva dolgoztuk a száltípusonként állandónak tekinthető szálhosszú, kétalkotós, hibrid szálfolyamokkal erősített kompozitok húzószilárdságának becslését. [OTKAKözl. 13]. Ezen eredményeket Czigány T., külső munkatárs hasznosította a 2005-ben megvédett MTA doktori dolgozatában.

(6) A kidolgozott modellre alapozva, a töretfelületből kiálló szálak helyzetének és hosszának elemzését felhasználó új kritikus szálhossz meghatározási módszert dolgoztunk ki [OTKAKözl. 50] Ezen eredményeket Ronkay F. doktorandusz, külső munkatárs hasznosította 2007-ben megvédett PhD dolgozatában.

A fentiek általánosításaként kidolgoztuk a tetszőlegesen rövid befogási hosszakra is érvényes, várható húzóerő-nyúlás folyamat leírására alkalmas modellt és általános formulát, amelyben figyelembe vettük a fentiekben a szakadási keresztmetszetet illetően alkalmazott, csak a környező szálak adta befogáson túl, a mintabefogók hatását is. Ennek megfelelően 2, 1, és 0-befogású szálakból álló kötegek párhuzamos kapcsolásként adódó kompozit köteg alkotja egy tetszőleges keresztmetszetet metsző szálak halmazát. [OTKAKözl. 29]

3.1.1.2. Kombinált kötegek kidolgozása

A különböző irányokban kivágott, laminált, lemezszerű kompozit próbatestek statisztikus szerkezeti és húzó-szilárdsági modelljének kidolgozását alapozandó, az E, EH, ES, és ET alapkötegek tulajdonságainak egyesítéseként bevezettük az EHS, EHT, EST és EHST kombinált kötegtípusokat, amelyek kötegnyúlás függvényében vett normált várható húzóerő folyamatának kiszámításához kidolgoztuk a vonatkozó – a várható érték számításának megfelelő, egymásba ágyazott paraméteres integrál alakú – formulákat. Az összes idealizált tulajdonság kombinálódik a bevezetett ESHT-kötegben, amelynek várható húzóerő-folyamatából annak a esetek, az ESH, EHT, EST-kötegek is megkaphatók. [OTKAKözl. 11,16,29,]

3.1.1.3. Viszkoelasztikus szálkötegcellák kidolgozása

További kiterjesztésként értelmeztük a viszkoelasztikus befogású elasztikus (E) szálak alkotta EV típusú, illetve a viszkoelasztikus anyagviselkedésű (V) szálakból álló szálkötegcellákat is, amelyek az E típusúakhoz hasonló rendszert alkotnak (V, VH, VS, VT, VHS, VHT, VST, VHST), és amelyekkel a terhelési sebesség hatása is tanulmányozható. Az alábbi alkalmazásokat dolgoztuk ki az ilyen szálkötegeket tartalmazó modellekre.

(1) Meghatároztuk a viszkoelasztikus befogású EV-szálkötegcella normált várható húzóerő folyamatát és elemeztük a különböző paraméterek hatását. [OTKAKözl. 29]

(2) Viszkoelasztikus beágyazású EH-kötegek sorozatával modelleztük a PET bizonyos húzási sebesség mellett fellépő húzóerő-oszcillációját. [OTKAKözl. 48] Ezen eredményeket Ronkay F. doktorandusz, külső munkatárs hasznosította 2007-ben megvédett PhD dolgozatában.

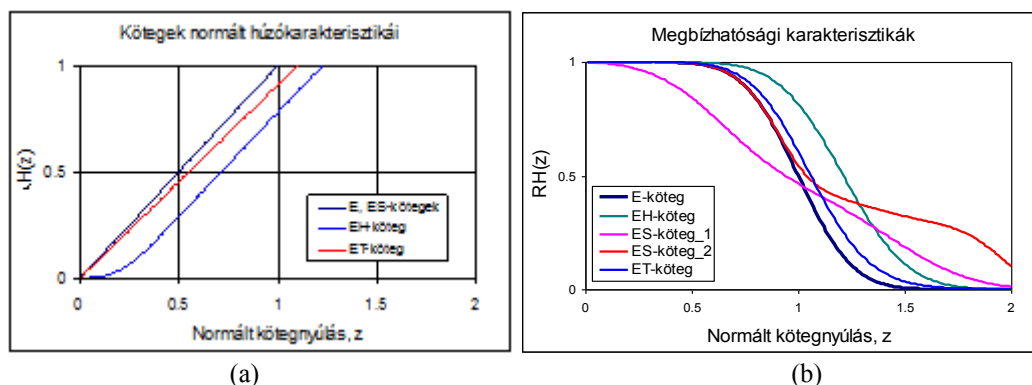
(3) Viszkoelasztikus kötegmodellt dolgoztunk ki PP, illetve rövidszálas PP kompozitok ciklikus fárasztása során változó húzórugalmassági modulus és a tönkremenetel leírásához, ahol a molekulaláncokat (PP), illetve az erősítő szálakat Maxwell modellek (PP kompozit), míg a környezetet egy Kelvin-Voigt modell segítségével modelleztük. [OTKAKözl. – benyújtás 2009-ben] Ezen eredményeket Pető I. közlekedésmérnök doktorandusz, külső munkatárs hasznosítja 2009-ben benyújtandó PhD dolgozatában.

(4) E témakörbe tartozik a modellezendő polimerek, termoplasztikus mátrixú kompozitok viszkoelasztikus tulajdonságainak, jelesen a kúszási, vagy feszültségrelaxációs tulajdonságok feltárása a viszkoelasztikus kötegmodellek alkalmazásához. Ezzel kapcsolatban kidolgozott koncepciónk szerint a mérésel meghatározott pl. kúszásgörbék és szakítógörbék között életút kapcsolat van, miszerint a vizsgált polimer életútja és élettartama a terhelési körülményektől függ és ez a függés alapvetően determinisztikus, feltárható. E kapcsolat ideálisan lineárisan viszkoelasztikus (LVE) viselkedés esetén a különböző terheléseket figyelembe véve meghatározható, ami reális kúszásgerjesztéssel végzett kúszásvizsgálat és az erővezérelt szakítóvizsgálat között egyszerű rekurzív formulával meghatározhatónak bizonyult. Tehát a mért szakítógörbéből e formulával egy LVE kúszásgörbe számítható, aminek – a koncepció szerint – alkalmas változó transzformációjával a valós, mért kúszásgörbe kapható. E nemlineárisan viszkoelasztikus viselkedésre vonatkozó változó transzformáció lényegében hasonló elvű a polimereknél jól ismert hőmérséklet-idő ekvivalencia érvényesítésére használt WLF vagy Arrhenius egyenlet szerepéhez, csak itt szakítási idő \rightarrow kúszási idő transzformációról van szó. Mindezen kérdések megoldása jelentősen előkészíti a termoplasztikus polimerek, illetve termoplasztikus mátrixú kompozitok kötegelvű modellezésének lehetőségeit. [OTKAKözl. 28,32,37,43,44]

Megjegyzendő, hogy a témavezető irányította ezen témában, Nagy P. munkatárs PhD disszertációt nyújtott be 2007-ben, amit sikeresen védett 2007. november 21-én. [OTKAKözl. 37]. TDK dolgozatok és diplomaterv készítése révén a téma folytatója Bakonyi P., aki 2009-től a témavezető doktorandusza.

3.1.1.4. Várható húzóerő karakterisztika és a megbízhatósági karakterisztika

A várható húzóerő karakterisztika ($\kappa H(z)$) a tönkremenetel-mentes szálkötegcellák várható húzóerő folyamata (7.a. ábra). A szálkötegcellák megbízhatósági függvénye, amely az ablakfüggvény várható értékeként számítható, lényegében a vonatkozó tönkremenetel szemszögéből ép szálak arányát adja meg az adott nyúlásterhelés mellett és a szálkötegcella erőközvetítésének megbízhatóságára utal. Ennek a soros kapcsolás szempontjából célszerű közelítéseként bevezettük az E-köteg viselkedésének általánosításaként definiált megbízhatósági karakterisztika ($RH(z)$) fogalmát, ami a várható húzóerő-folyamat ($FH(z)$) és a várható húzó-karakterisztika hányadosaként számítható (7.b. ábra; az ES-köteg_1 és ES-köteg_2 különböző paraméterekkel számolt ES-kötegek). [OTKAKözl. 29]



7.ábra. Szálkötegcellák várható húzó- (a) és megbízhatósági (b) karakterisztikái

3.1.1.5. Szálkötegcellák soros kapcsolása

A gyenge láncszem elvet [1], a köteglánccok elméletét [2,3] és a megbízhatóságelmélet alapvető módszereit szem előtt tartva, értelmeztük a szálkötegcellák soros kapcsolásának módozatait és tanulmányoztuk a törvényszerűségeit. A mérethatások, mint pl. a befogási hosszának a szilárdságra gyakorolt hatása, az azonos típusú SKC-k soros kapcsolásával tanulmányozhatók [OTKAKözl. 29; 49]

(1) Kimutattuk, hogy a kötegek *szálfolyam elvű* soros kapcsolása, amelynek során a sorbakapcsolt kötegek száalai egymással folytonosan, vagy általában szálláncot alkotva kapcsolódnak össze, és ez egy új, a köteglánccal megegyező hosszúságú szálakból álló, általánosabb tulajdonságú, legáltalánosabban egy, a részkötegekből meghatározható paraméterű EHST szálköteget eredményez. [OTKAKözl. 29]

(2) A másik értelmezési lehetőség a szeparált kötegekből álló, klasszikus *köteglánc* (8. ábra), amelyre nézve kimutattuk, hogy a gyakorlatban szokásosan alkalmazott független elemű kötegláncként való kezelésük bizonyos feltételek, illetve közelítő jelleggel történhet. [OTKAKözl. 29]

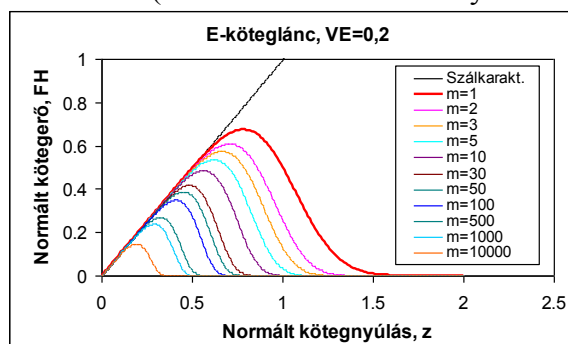


6. ábra Köteglánc, mint szálkötegcellák soros kapcsolása

(3) A független elemű, de azonos szálkötegcellákból álló köteglánccok várható húzóerő-folyamatának becsléséhez értelmeztük a kötegek húzó-karakterisztikáját és megbízhatósági karakterisztikáját. Ezzel a független elemű köteglánc várható húzóerő-folyamata a kötegek megbízhatósági karakterisztikáinak és az eredő várható húzó-karakterisztika szorzatával az E-köteglánc módjára becsülhető. „m” számú E-köteg sorba kapcsolása esetén a megfelelő, ez esetben pontos, formulák a következők [OTKAKözl. 29, 45]:

$$FH(z) = \kappa H(z) (RH_E(z))^m, \quad RH_E(z) = \frac{FH_E(z)}{\kappa H_E(z)} \quad (3)$$

A 8. ábrán a sorba kapcsolt E-kötegek m-számának hatása látható. Az m növelése csökkenti az eredő köteglánc erőcsúcs értékét (VE a szálak szakadási nyúlásának relatív szórása).



8. ábra. Sorosan kapcsolt E-kötegek normált várható húzóerő-nyúlás görbéi

(4) Elemeztük a nagy szálszámú, ezért közelítőleg a várható húzóerő-folyamatot megvalósító köteglánccok gyenge láncszemének és a köteglánc erőcsúcs utáni lefutó ágának a nyúlástartalékát és meghatároztuk a katasztrófászerű szakadás feltételét. Ennek során az azonos erőszinthez tartozó nyúlások additivitásán alapuló, programozható módszert nyertünk a különböző típusú szálkötegcellák alkotta köteglánccok eredő húzóerő-nyúlás

összefüggésének meghatározására is. E módszer használható a köteglánc eredő húzókarakterisztikájának kiszámításához is. [OTKAKözl. 29, 49]

3.1.1.6. Rövidszálas bazalt/PP kompozitban a szálfejek hatása

A szálpaplanokhoz korábban kidolgozott statisztikus szerkezeti modell és a szálköteg-viselkedés segítségével elemeztük a rövid bazaltszálas kompozitokban a szálfejek szilárdságra gyakorolt hatását. [OTKAKözl. 31] Ezen eredményeket Pölöskei K. doktorandusz, külső munkatárs hasznosította 2006-ban megvédett PhD dolgozatában.

3.1.1.7. Kompozit cső kötegmodellje

3D-s réteges kötegmodellt dolgoztunk ki fonatolt szerkezettel erősített szénszál/epoxi kompozit cső húzóvizsgálatának elemzéséhez. Kimutattuk, hogy a 45°-os ferdeségű fonatolt rovingrétegek nyilvánvaló ET-kötegmodelljei mellett – a különböző feszeséggel beépült rovingok miatt – szükség van az EH-, illetve EHT-kötegek alkalmazására is. [OTKAKözl. 11,16] Ezen eredményeket Zsigmond B. doktorandusz, külső munkatárs hasznosította 2005-ben megvédett PhD dolgozatában.

3.1.1.8. Akusztikus emissziós folyamat szálköteg-modellje

A kompozitok húzóvizsgálata során regisztrált akusztikus eseményfolyamat leírásához és elemzéséhez szálköteg-elvű modellt dolgoztunk ki, ahol a különböző típusú lokális tönkremeneteleket jelző eseményeket (rezgéscsomagok), mint mátrix repedés, szál-mátrix elválás, szálkicsúszás és szálszakadás, különböző típusú szálakból álló szálkötegek párhuzamos kapcsolásával kapott kompozit köteg szálszakadásaival modelleztük. E módszer lehetővé teszi a különböző típusú tönkremenetelek, mint eseményfolyamatok és a vonatkozó rezgésamplitúdók különválasztását, így a regisztrált együttes folyamat dekompozíciójával következtetni lehet tönkremenetel típusok – kompozitra jellemző – részarányaira, a különböző terheléseknél domináns tönkremenetelek meghatározására. Ezen eredményeket Kocsis Z. doktorandusz, külső munkatárs hasznosította 2008-ban megvédett PhD dolgozatában. [OTKAKözl. 2009-ben]

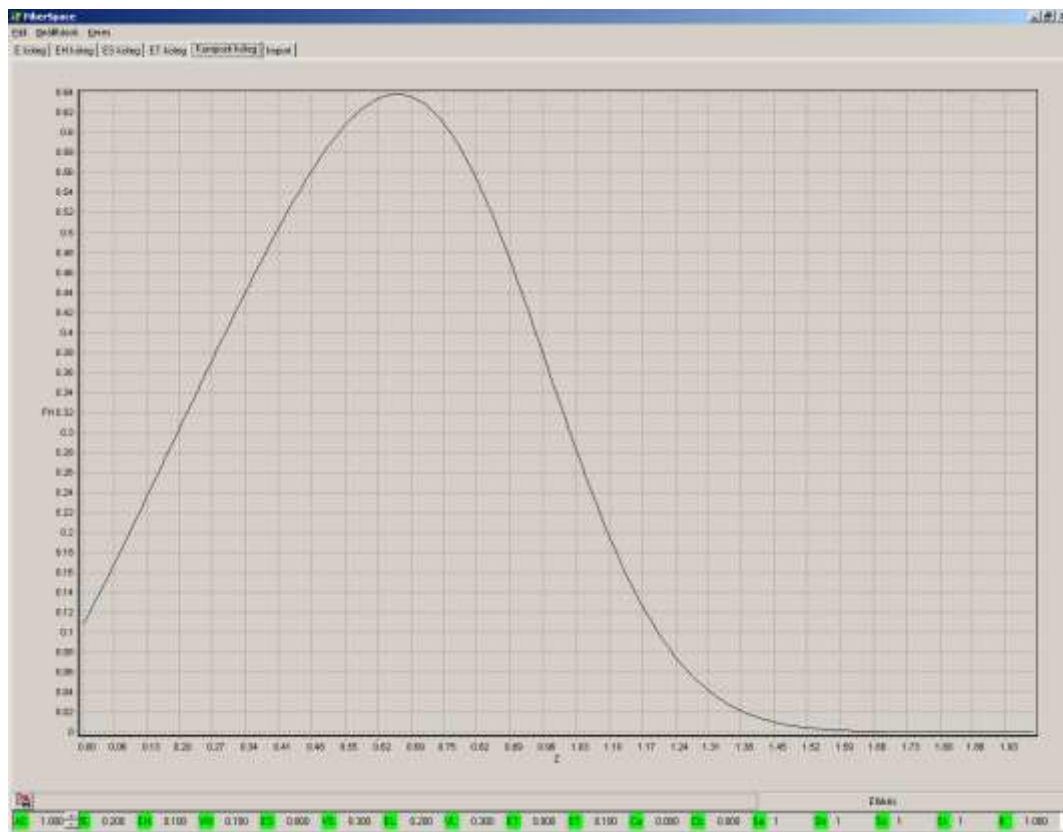
Az idealizált statisztikus szálkötegeken, mint modellelemeken alapuló szerkezeti-szilárdsági modellezés addig kidolgozott elméletét és alkalmazásait összefoglalva, a témavezető MTA doktori disszertációt nyújtott be 2007. februárjában, amit sikeresen védett 2008. május 26-án. [OTKAKözl. 29]

3.1.2. FiberSpace kötegmodellező szoftver fejlesztése és alkalmazása

Kidolgoztuk a méréseredmények elemzésére és anyagmodellek kialakítására alkalmas, FibrSpace-nek elnevezett, kötegmodellező program menüvezérelt koncepcióját, és bemutattuk a megvalósított aktuális változattal végzett fenomenológiai kötegmodellezés egyes eredményeit (pamutszálköteg Spinlab HVI szakítása, valamint üvegrovíng, pamut szálszalag, gyűrűs és turbinás font fonalak szakítása). [OTKAKözl. 22,29,34,39,40,45,49]

(1) Kidolgoztuk és megvalósítottuk az adott, a Microsoft Excel táblázatból átvethető mérési eredményre, interaktív kereséssel illeszthető, szálas szerkezetek húzó-szakító folyamatát idealizált szálkötegcellák (E, EH, ES, ET) súlyozott párhuzamos kapcsolásával modellező számítógépes programot Delphi környezetben (9. ábra). [OTKAKözl. 22,29]

(2) A program lehetővé teszi a modellezett, normált vagy denormált eredmény Excelbe való transzportját is. [OTKAKözl. 22,29,34]



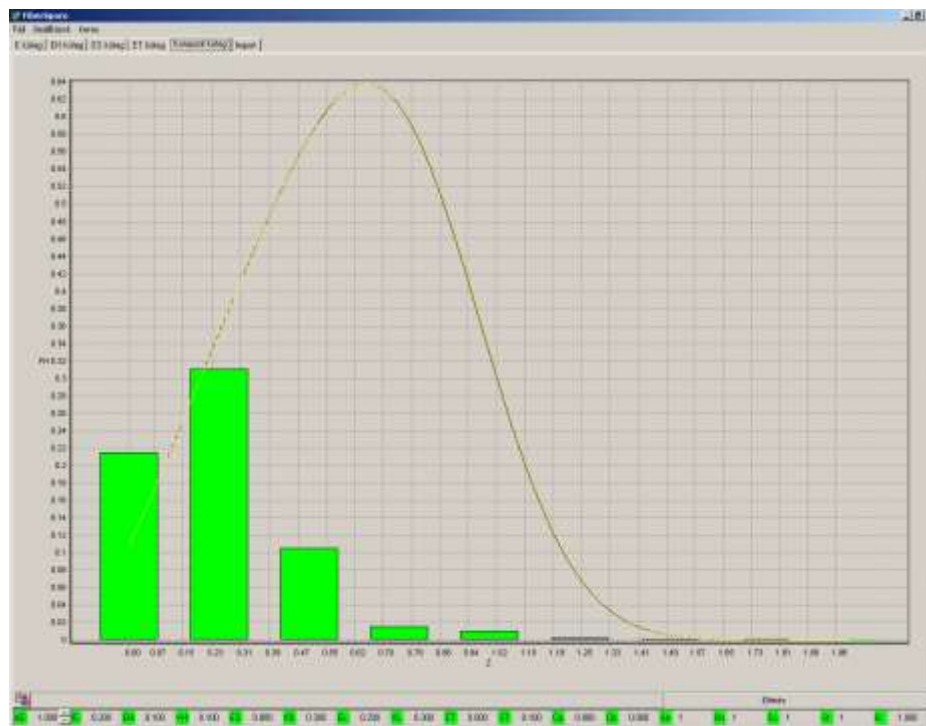
9. ábra. FiberSpace kezelőfelülete és kompozit köteg megjelenítése

(3) A program alkalmas arra is, hogy E-kötegek esetében a várható húzóerő görbe konfidencia intervallumát is meghatározza, illetve egy választott paramétersorozatnak megfelelő görbeseregeket jelenítsen meg, és elemezhető a paraméterek hatása. [OTKAKözl. 22,29,34]

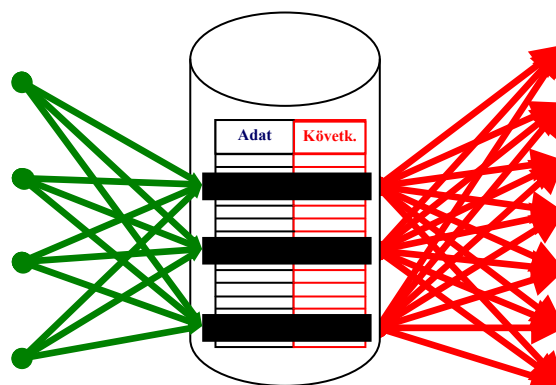
(4) A Delphi környezetben megvalósított FiberSpace kötegmodellező programban, a szálak szerkezetek mért húzóerő folyamatának fenomenológiai modellezése során, az idealizált statisztikus (E, EH, ES, ET) szálkötegcellák súlyozott párhuzamos kapcsolásával szerkesztett kötegmodell összesen 17 paraméterének (normáló tényezők, súlytényezők, a szálkötegcella jellemzők várható értékei és relatív szórásai, a kontrakciós függvény állandói) optimális meghatározásához – a korábbi, interaktív manuális eljárás kiváltásához – a KERESÉS menüpontban elérhető, automatikus, a legkisebb négyzetek elvét alkalmazó eljárást dolgoztunk ki. Az eredmény Microsoft Excel fájlként is elmenthető. [OTKAKözl. 39]

(5) Ennek továbbfejlesztéseként, a numerikus problémákat elkerülendő, egy tanulásképes szakértői rendszert dolgoztunk ki a kezdeti paraméterértékek gyors meghatározásához. Itt kötegtípus osztályokat definiáltunk, amelyekhez kezdőérték paraméterkészlet tartozik. A modellezendő kötegszakítógörbe Fourier sorának első néhány (általában 8) tagjának együtthatói alapján (10. ábra) választjuk ki a legközelebbi modell-kötegtípus osztályt (11. ábra, zöld nyilak), amelyhez tartozó következtetett paraméterértékeket (11. ábra, piros nyilak) kezdőértékeként alkalmazunk (12. ábra) a legkisebb négyzetes elvű finomító KERESÉS során, az adott eltéréskorlát alá kerüléséig. [OTKAKözl. 39, 45, 49]

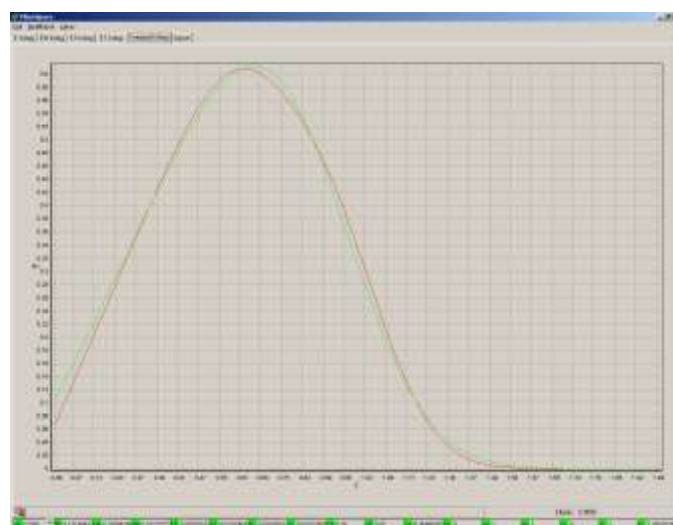
(6) Kötegmodellezés segítségével elemeztük az üvegszál-paplanokból vett szálkötegekben a szálak szilárdság-kihasználását és az írező anyag együttdolgozást segítő hatását. Kimutattuk, hogy az együttdolgozás révén a szálszilárdság kihasználás több mint 10%-al is nőhet a független szálú szálkötegekhez képest. [OTKAKözl. 41,47]



10. ábra. Modellezendő erő-nyúlás görbe Fourier közelítése és együtthatók



11. ábra. Az összefüggések feltárásának és a következtetőrendszer vázlata



12. ábra. Következtetett kezdeti értékekkel számolt (még finomítandó) kötegmodell (piros) és a közelítendő mérési eredmény (zöld)

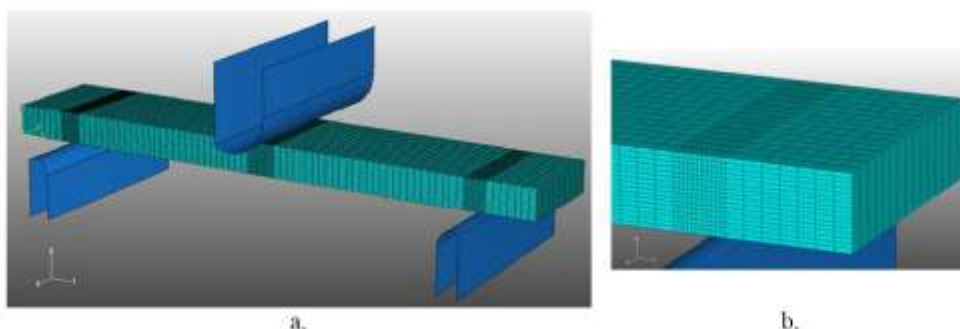
(5) Program formában megvalósítottuk a sorba kapcsolt, különböző típusú szálkötegcellák alkotta köteglánc várható húzóerő folyamatának kidolgozott meghatározási módját. Ennek során a sorba kapcsolt cellák, a programban megszerkesztett kompozit kötegek is lehetnek, illetve a köteglánc még párhuzamosan kapcsolható egy újabb kompozit köteggel, megvalósítva ezzel a kompozit köteghálózatok szerkesztését. A kompozit kötegek sokszorozása révén alkalmassá tehető különböző szerkezetű rétegekből összetett struktúrák modellezésére is. Mindez lehetővé teszi, hogy például az erősen orientált lineáris polimerek, polimer szálak Prevorsek-féle modelljét, illetve annak Takayanagi által bevezetett blokkos változatának, kötegmodellezést felhasználó tanulmányozását, elemzését. Vizsgálható így a kristályos részarány, kristályos részecskenagyság és az amorf orientáció hatása. [OTKAKözl. 49]

3.1.3. Végeselemes modell fejlesztése

A laminált, szöveterősítésű kompozitokból, különböző irányokban kivágott, illetve unidirekcionális erősítésű próbatesteken végzett hajlítóvizsgálatok során tapasztalt deformációs és töréskimeneteli jelenségek, mérőhatások értelmezéséhez, feszültségeloszlás alapú magyarázatához végeselemes modellt dolgoztunk ki és alkalmaztunk kis és nagy deformációk melletti elemzésekre.

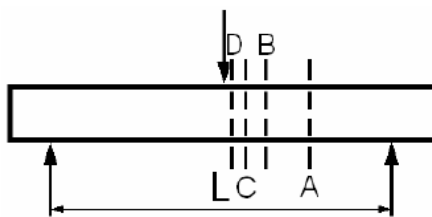
(1) A hajlítóvizsgálat végeselemes modelljének első változatát Cosmos 2.8 környezetben dolgoztuk ki, *unidirekcionális* kompozit próbatestekben az elmozdulás és feszültségmezők meghatározásához, a hajlítóvizsgálatok kiértékeléséhez, a törési viselkedés okainak elemzéséhez.

(2) A hajlítóvizsgálat – az első lépésben kidolgozott és Cosmos 2.8 környezetben megvalósított –végeselemes modelljét ABAQUS környezetben továbbfejlesztettük a nagy lehajlások és a változó geometria figyelembe vételéhez. A háromdimenziós modell 16 rétegből (egy réteg vastagsága 0,25 mm) áll, rétegenként ortotróp anyagmodellt alkalmaz (12. ábra). A nyomófej és az alátámasztás merev testként került definiálásra és a hajlítás során a terhelésátadás kontakt-felületeken történt, figyelembe véve a súrlódást is. A nyomófej és alátámasztás környékén az elemeket sűrítettük, azaz méretüket megfelelően kicsire választottuk. Így modellezhetővé vált a véges lekerekítési sugarú alátámasztásokon történő legördülés és támaszközváltozás is. A valós kísérleteknek megfelelően útgerjesztést alkalmaztunk, az így kapott eredmények a reakcióerő – idő vagy lehajlás görbe, illetve a háromdimenzióban értelmezhető feszültségtenzor elemei. Ezek segítségével pontos képet kaphatunk a próbatestben ébredő csúsztatófeszültség eloszlásának jellegéről ill. a nyomófej és alátámasztás „zavaró” hatásáról. [OTKAKözl. 38]



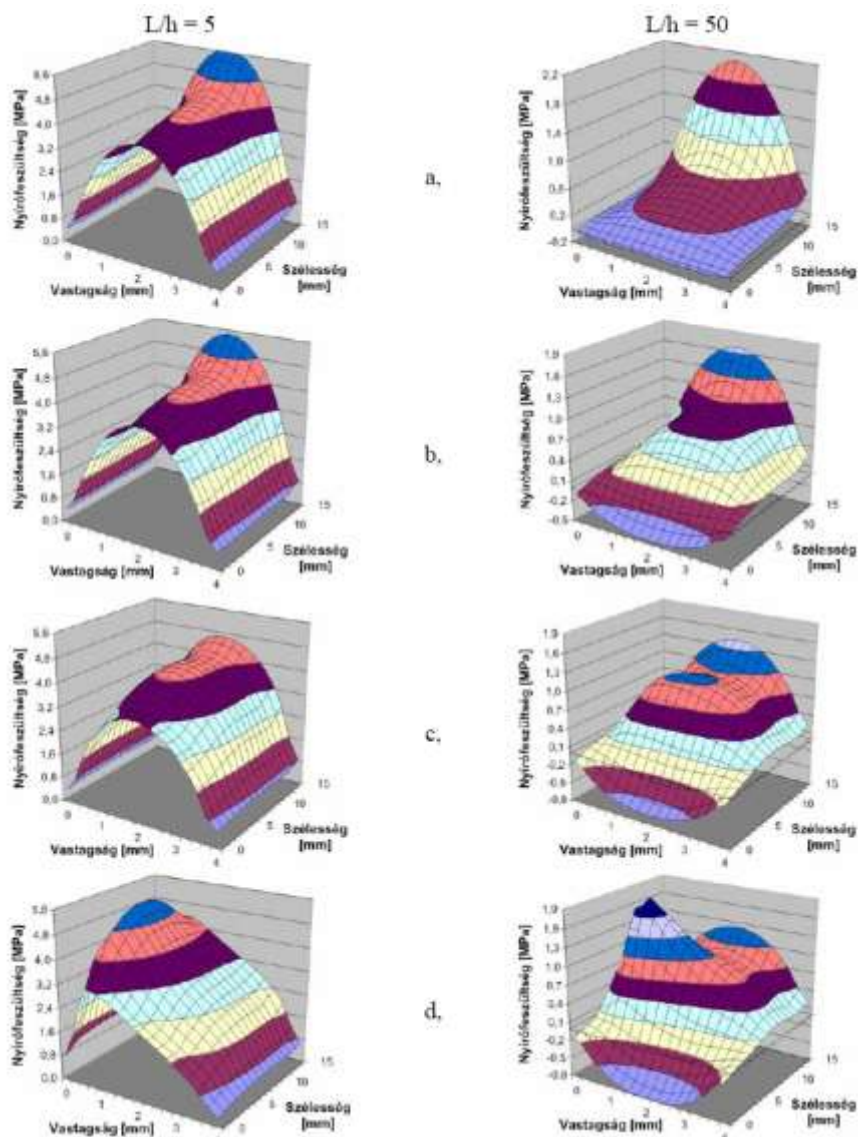
13. ábra. A végeselemes modell (a) és az érintkezéseknél sűrített háló (b)

(3) A vizsgálatok kimutatták, hogy a 3P-os hajlítóvizsgálat során a nyírófeszültség eloszlások a nyomótest közelében aszimmetrikusak és attól távol, az alátámasztás és a nyomófej között közel szimmetrikus (14. ábra).



14. ábra. A rétegek közötti nyírófeszültség eloszlások származási helye

Az aszimmetria nő, ha a hajlított próbatest szövetet alkotó erősítő szálai aszimmetrikusan helyezkednek el a rúd középvonalához képest (15. ábra). Az aszimmetrikus nyírófeszültség eloszlás csavarónyomatékokat generál, ami a rudat elcsavarva, torzítja, és többek között egyenlőtlen felfekvést okoz az alátámasztásokon.



15. ábra. Rétegek közötti nyírófeszültség eloszlások a $22,5^\circ$ -ban kivágott próbatestek hossz tengelyén (távolság a nyomófejtől: a: $L/4$, b: h , c: $h/2$, d: $h/4$)

(4) Hárompontos elrendezésű, különböző geometriai és szerkezeti viszonyok mellett végrehajtott hajlítóvizsgálatok végeselemes modellezése révén részletes elemzéseket végeztünk. A mérési és szimulációs eredményeket, a geometriai különbségek (a végeselemes szimulációkat a névleges $b \times h = 15 \times 4$ mm-es próbatest keresztmetszettel hajtottuk végre) kiküszöbölése végett, a rúdelmélet szerinti maximális rétegeközi nyírófeszültségekkel hasonlítottuk össze a lineáris terhelőerő – lehajlás szakaszon ($\varepsilon \leq 0,5\%$). Az erőbevezetés és támasz közötti szakasz felénél az eredmények jó egyezést mutattak. A próbatest hossza (támaszköz: L) mentén négy keresztmetszetben (a nyomófejtől $L/4$, h , $h/2$ és $h/4$ távolságra; h szélesség) elemeztük a nyírófeszültségek vastagság (h), ill. szélesség (b) menti eloszlását. A láncirányú mintáknál fellépő, feszültségkoncentráció miatti rétegeközi nyírófeszültség eloszlások torzulása a szakirodalomnak megfelelő volt. A $22,5^\circ$ -ban kimunkált próbatesteknél a nyírófeszültségeket az aszimmetrikus szerkezeti felépítésből származó csavarónyomaték jelentősen gyengítheti, vagy erősítheti, így a próbatest két széle között jelentős igénybevétel eltérés jöhet létre. A végeselemes szimuláció segítségével bebizonyítottuk, hogy a próbatest szélein jelentkezik az elcsavarodásból származó jelentős torzító hatás, amely $L/h = 50$ -nél akár kétszeresére is erősítheti a csak nyíróerőből származó lokális rétegeközi nyírófeszültséget. Ezen eredmények jelentősen segítik a kötegelméleti modellek kidolgozását. [OTKAKözl. 38; cikk készül 2009-ben]

A fenti eredményeket, a témavezető irányításával, Simon Z.L. doktorandusz munkatárs hasznosította, 2008-ban sikerrel védett PhD dolgozatában. [OTKAKözl. 38]

3.1.4. Szálas szerkezetek és folyadékfelszívó képességük modellezése

A korábban, az OTKA T 022077 (1997-1999) kutatás keretében, a szabálytalan szerkezetű erősítő anyagok és abból kivágott minták tulajdonságainak modellezésére kidolgozott statisztikus szálpaplan modellre, a folyadékfelvétel irodalmára, valamint a kötegelméleti eredmények egyes vonatkozásaira alapozva dolgoztunk modelleket és alkalmazásokat, amelyeket az erősítő anyagok fonal- és rovingelemei, illetve a szálpaplanok folyadékfelvételével, valamint a szálpaplan és/vagy szöveterősítésű laminált kompozitok gyártása során végbemenő gyantafelvételi folyamatok leírására, a velük kapcsolatos mérések kiértékelésre használtunk fel. [OTKAKözl. 2-8,10,15,17,20,26,35,36]

(1) A szálpaplan modell orientált változata, mint hengerrétegek alkotta fonalmodell alapján határoztuk meg a fonalban lévő pórusláncok, kapillárisok szerkezetét, méreteik eloszlását, amit font poliészter fonalak szálai közti sodrattól függő pórusok, illetve a fonalköteg fonalai közti pórusok keverékeloszlásaként azonosítottunk a fonalhalmaz higanyos porozitás-mérésének kiértékelésénél. [OTKAKözl. 3,4,5]

(2) A kapilláris folyadékfelvétel időbeli lefolyását leíró Lucas-Wasburn-féle differenciálegyenlet implicit megoldásának nehezen kezelhető volta miatt annak kis időkre vonatkozó, \sqrt{t} -vel arányos közelítését használják a felszívási folyamatok mérésére szolgáló készülékek (pl. a Krüss K-12) eredményeinek kiértékelésénél. Ugyancsak ilyen formájú a Fick-féle diffúziós egyenlet megoldásának kezdeti közelítése is, így kis időkre a két folyamat additív. Ez azonban nem alkalmas a folyadéktömeg-felvételi folyamat m_∞ egyensúlyi értékhez tartásának, az egyensúlyi folyadéktartalom viszonylag rövidebb idejű mérések alapján történő meghatározásához. Ezért a Lucas-Washburn egyenlet implicit megoldásának olyan közelítését dolgoztuk ki (ld. a (4) összefüggést), amelynek a kis időkre vonatkozó kezdeti aszimptotája és a hosszabb idők után kialakuló m_∞ egyensúlyi értéke megegyezik a korrekt implicit megoldásával, ugyanakkor invertálható, azaz explicit formába alakítható, továbbá kevés paraméterrel jól identifikálható (a_m a kapillárismérettől, a nehézségi gyorsulástól, valamint a folyadék sűrűségétől és dinamikai viszkozitási tényezőjétől függő állandó, míg p és q a felszívás dinamikáját befolyásoló állandó kitevők).

$$m(t) = m_{\infty} \left[1 - e^{-\left(\frac{2a_m t}{m_{\infty}}\right)^p} \right]^q, \quad t > 0, \quad pq = 1/2 \quad (4)$$

Ennek alapján meghatároztuk a statisztikus kapilláris köteg folyadékfelvételéből az átlagos kapilláris-átmérő meghatározási módját is. [OTKAKözl. 6,7,10,15,20] Az explicit megoldást Czél G. munkatárs is hasznosította a 2009. évben védendő PhD dolgozatában.

(3) A statisztikus szálpaplan modell alkalmazásaként meghatároztuk a laminált szálpaplan szerkezetek keresztirányú átmenő pórusláncainak, mint kapillárisnak a pórus- vagy kapilláris-átmérő eloszlásfüggvényét, illetve annak a CCD kamerás felvételekkel, vagy szkenneléssel detektálható mérettartományra vonatkozó feltételes eloszlását. [OTKAKözl. 8,17,26]

A fenti eredményeket, a témavezető irányításával, Nagy V. doktorandusz munkatárs, 2006-ban sikerrel védett PhD dolgozatában [OTKAKözl. 15], továbbá e témában a munkáját követő Gombos Z. doktorandusz munkatárs a 2009 áprilisában munkahelyi vitára kijelölt PhD dolgozatában hasznosította.

3.2. KÍSÉRLETI VIZSGÁLATOK

3.2.1. Mérő-kiértékelő eszközök és eljárások fejlesztése

A négyéves kutatás során számos, a kutatási cél elérését alapozó, vagy segítő kísérleti eszköz fejlesztését, beszerzését végeztük el. A beszerzések egy részénél a kutatás erre fordítható keretei mellett más tanszéki forrásokat is igénybe vettünk.

(1) A kompozit minták töretfelületének elemzéséhez egy Jeol-6380LA típusú pásztázó elektronmikroszkópot és egy JFC-1200 típusú vákuumos fémgőzölő – a GVOP-3.2.1.-2004-04-0148/3.0 jelű műszerpályázat és tanszéki források fedezete melletti – beszerzéséhez járultunk hozzá.

(2) A kisátmérőjű szálak pontosabb vizsgálatához fejleszteni tervezett Projectina 4011-4016/MMA típusú textilmikroszkóphoz, az OTKA 821 kutatás (1991-1994) keretében a KFKI MFI-vel együttműködésben kifejlesztett és megvalósított – lényegében egyedi – CCD kamerás rendszer időközbeni súlyos meghibásodása és a korszerűbb képfeldolgozó rendszer magas beszerzési ára miatt a Projectina rendszer optikai fejlesztését elhalasztottuk és az időközben beszerzett Olympus BX51M fénymikroszkóp fenti igényeknek megfelelő fejlesztését (az optikai rendszer max. felbontása 370 nm, a digitális kamera felbontása 5,1 Mpixel; AnalySIS Five Steel Factory) végeztük el tanszéki forrásokból. A fénymikroszkóp szálak szerkezetek, szálkötegek és kompozitok elemzéséhez szükséges (2-5x nagyítás) makro-optikát szereztünk be.

(3) A kísérleti vizsgálatokhoz alkalmazott (szálszakításokhoz Z005, a kompozit próbatestek hajlításához a Z020, szakításához a Z050 típusú) Zwick szakítógépek és a hozzájuk adaptált CCD kamerás Zwick extenzométer, valamint a független számítógépekhez kapcsolt – kiegészítő szerepű – CCD kamerás képfeldolgozó rendszer és az újonnan beszerzett AED-40 SENSOPHONE akusztikus emissziós (AE) mérőkészülék szimultán működését – a kidolgozott, az új hardver-szoftver lehetőségeket kihasználó megoldás szerint – a szakítógép keresztfej elmozdulásával generált indítójel biztosítja, amelynek révén indíthatók a beállítható időközönkénti képfelvételek, valamint az AE események detektálása, elemzése és számlálása. [OTKAKözl. 1,9,14,18,30,38]

(4) A modellezéshez, magasszintű programcsomagok (végeselemes szoftver) futtatására, kezelésére korszerűsítettük és egységcserekkel növeltük a megfelelő, multimédiás számítógépek teljesítményét.

(5) A laminált kompozit minták előállításához kifejlesztett és használt, nyomással és vákuummal is működő, injektoros szerszámban végbemenő gyantafelszívódási folyamatok tanulmányozásához egy, szakítógépre adaptált, mérő berendezést dolgoztunk ki és valósítottunk meg, amely alkalmas a lapok közötti erősítő rétegek beállítható vastagsága mellett, a szerszámnak megfelelő légáteresztési, illetve folyadék-áteresztési (desztillált víz és a gyantának megfelelő viszkozitású szilikon olaj, illetve cukorszirup) tulajdonságainak tanulmányozására. [OTKAKözl. Vonatkozó cikk és Gombos Z. PhD dolgozatának benyújtása 2009-ben tervezett]

(6) A tanszéki Zwick szakítógéphez mérési módszereket és alkalmas készüléket dolgoztunk ki lapszerű szálak szerkezetek (szálpaplanok és rovingszövetek) lapra merőleges irányú folyadék- és gyantafelszívási folyamatának vizsgálatához. [OTKAKözl. 2,6,7]

(7) Új, a kontúrgörbe képfeldolgozással történő meghatározásán és elemzésén alapuló mérési-kiértékelési eljárást dolgoztunk ki a hajlítómódulus meghatározására. Az eljárás nem használja a klasszikus hajlításelméleten alapuló, közelítő, és csak kis lehajlásra vonatkozó, ún. járulékképleteket, hanem a mért kontúrgörbe alapján határozza meg a görbületet, majd az ugyancsak mért hajlítónyomatékot felhasználva a hajlítómerevséget, illetve hajlítómódulust. [OTKAKözl. 18]

(8) Újszerű mérési-kiértékelési eljárást dolgoztunk ki a laminált kompozit próbatestek deformációinak meghatározásához. A két vonaljelet és a kontúrokat felhasználó extenzométerrel szemben, két – nem főirányokban kivágott próbatestek esetében a lánc- és vetülékirányokat követő – egymást metsző egyenest rajzolva a próbatest felületére, húzóvizsgálatnál a vonalkereszt húzásirányú elmozdulásából és a szögváltozásból – a szálak orientációváltozásán túl, a próbatest hossz- és keresztirányú deformációi is meghatározhatók. Hajlításnál a vastagsági kontúrok változása alapján a ferde szálrétegek miatt fellépő, esetleges elcsavarodás és delamináció is detektálható. [OTKAKözl. 9,30,38]

3.2.2. Próbatest gyártó eszközök és módszerek fejlesztése

A megfelelő minőségű és reprodukálható próbatestek előállítása a kísérleti vizsgálatok alapvető követelménye. Ezért a számos kritikus hibalehetőséggel rendelkező kompozit lapok gyártásához alkalmas szerszámokat és technológiát fejlesztettünk ki, illetve a próbatest kivágást segítő készülékeket szereztünk be.

(1) Reprodukálhatóan jó minőségű laminált gyantakompozit minták előállításához injektoros szerszámot terveztünk és viteleztünk ki, ezzel elsőként vezetve be ezt a technikát a Tanszékünkre. A vákuuminjektoros szerszám alsó ill. felső szerszámfélből épül fel. Az alsó szerszámfél poliészter mátrixú üvegszál erősítésű kompozitból készült, alakadó felületét szerszámgéllal kezelve, a vákuumnyomás megőrzéséhez szilikongumi szigetelést használva. A szerszámüreg mérete 360x360x4 mm. A szerszám két vákuumkörrel rendelkezik. Az első vákuumkör a gyanta szerszámüregbe juttatását szolgálja, míg a második vákuumkör feladata a szerszám zárása. A felső szerszámfél egy 20 mm vastag üveglap, így CCD kamera révén megfigyelhetővé és regisztrálhatóvá vált az erősítőanyag impregnálásának és a szerszám kitöltésének folyamata. Az alkalmazott gyantatípusok viselkedésének részletes vizsgálata alapján, megfelelő gyártástechnológiát dolgoztunk ki a reprodukálhatóan jó minőségű, 3D-s laminált kompozit minták az új szerszámmal történő előállításához. [OTKAKözl. 9,18,30,38]

(2) A kísérleti vizsgálatokhoz szükséges próbatestek laminált kompozit lapokból való pontos, minőségi kimunkálásához, a bemetszések elkészítéséhez egy körfűrész, fokozatmentesen

állítható fordulatszámú MUTRONIC Diadisc 4200 R berendezést szereztünk be és helyeztünk üzembe, több tanszéki forrást felhasználva.

(5) Új, a ferdeszálas szerkezetekhez, szövödékekhez, a statisztikus szálpaplan modell továbbfejlesztéséhez kapcsolódó, Molnár K. TDK, diplomaterv és 2009. évtől doktori témájaként, egyelőre PVA oldatból, elektrosztatikus térben történő – a libereci Nemszött Textíliák Tanszékén kidolgozott eljáráshoz hasonló – szálképzéssel, nanoszálal szövödékek előállítására alkalmas készüléket dolgoztunk ki. A készülék továbbfejlesztett változata, egy szabályozható kerületi sebességű forgó dob segítségével, orientált szerkezetű szövödékek előállítására is alkalmassá vált. [OTKAKözl. 42]

(6) Az injektoros szerszámmal kidolgozott gyártástechnológiai folyamat elemzéséhez és további fejlesztéséhez kapcsolódóan egy speciális, egytengelyű gyantaáramlást biztosító injektoros szerszámot dolgoztunk ki és viteleztünk ki, amely mind vákuumos, mind túlnyomásos gyantabevitelre is alkalmas. Ennek segítségével tanulmányozható és méréssel egyszerűen kiértékelhető a gyantafelvételi folyamat a szerszámban. [OTKAKözl. Gombos Z. 2009-ben védendő PhD. dolgozata]

(7) A rövidszál-erősítésű, termoplasztikus mátrixú, különböző vastagságú kompozit lap próbatestek előállításához alkalmas fröccsöntő szerszámot dolgoztunk ki és valósítottunk meg egy kapcsolódó doktori munka [Solymossy B.] keretében.

3.2.3. Kísérleti vizsgálatok és eredményei

(1) Elemeztük a támaszköz/vastagság arány (L/h) befolyását folytonos-szálas, unidirekcionális, szénszál/epoxi kompozitok 3P-os hajlító szilárdsági és tönkremeneteli jellemzőit a $5 \leq L/h \leq 40$ támaszköz-próbatest vastagság arány, mint paraméter tartományban. Megállapítottuk, hogy a vonatkozó szabvány által a hajlítómodulus meghatározásához ajánlott $L/h \geq 16$ tartomány a vizsgált kompozitok esetében szűkítendő az $L/h \geq 25$ tartományra. CCD-kamerás tönkremenetel-elemzésekkel kimutattuk, hogy $L/h \leq 25$ esetén a tönkremenetel a nyomótest környezetében nyomótöréssel kezdődik, s csak e feletti L/h értékek esetében történik a kívánatos húzott oldali szakadásokkal. [OTKAKözl. 1,14]

(2) Az új szerszámmal legyártott ortotróp, $h \approx 4$ mm vastag, 16 szövetrétegből laminált ($0^\circ, 90^\circ$) szerkezetű próbatestekben az egyes erősítőrétegek nem kerültek forgatásra, így azokban csak 0° és 90° -ban álltak szálak. A hárompontos hajlításhoz a felhasznált próbatestek $0^\circ, 22.5^\circ, 45^\circ, 67.5^\circ$ és 90° -ban kerültek kimunkálásra. A hajlító vizsgálatokat $L/h = 5, 10, 16, 20, 25, 30, 40$ és 50 -nél (alátámasztási távolság/próbatest vastagság viszony) végeztük, állandó próbatest szélesség $b = 15$ mm mellett. $L/h = 25$ -nél a különböző irányokban kivágott próbatestek szélességének hatását is vizsgáltuk, $b = 10, 20, 40, 60$ és 80 mm volt. Az eredmények jelentős méret- és irányhatásokat mutattak mind a hajlítómodulus, mind hajlítószilárdság és tönkremenetel módja tekintetében. Különösen feltűnő jelenség volt a 22.5° , illetve 67.5° irányszögben kivágott, nem szimmetrikus szerkezetű próbatestek hajlítás alatti fokozódó elcsavarodása. Ez, a végelelemes vizsgálatok alapján, az aszimmetrikus nyírófeszültségek által generált csavarónyomatéknak volt tulajdonítható. A laminált próbatestek tönkremenetelét a rétegelválás (delamináció) dominálta. [OTKAKözl. 9, 18, 30, 38]

(3) A hárompontos hajlítóvizsgálatok kiegészítéséhez, 16 réteg üvegszövet erősítőanyagot és poliészter mátrixanyagot tartalmazó vákuuminjektált mintákon négyponos hajlítóvizsgálatokat végeztünk állandó terhelési viszonyok (terhelési sebesség, nyomófej-, ill. támaszok lekerekítési sugara) mellett hajtottuk végre. A vizsgálat során felhasznált próbatestek $0^\circ, 22.5^\circ, 45^\circ, 67.5^\circ$ és 90° irányban lettek kivágva. A négyponos hajlítóvizsgálat során a terhelési pontok távolsága/támaszköz viszony ($L_2/L = 0; 0,2; 0,33; 0,5$ és $0,66$) hatását állandó $L = 100$ mm-nél, ill. $b = 15$ mm-nél vizsgáltuk. A hajlító rugalmassági modulusz

átlagértékeire nem volt hatással a geometriai paraméter növelése. Növekvő L_2/L paraméterrel, a 0° és $22,5^\circ$ -ban kimunkált próbatestekben az ébredő hajlítófeszültségek, $\varepsilon \geq 1\%$ esetében monoton növekvő jelleget mutattak. Ezt a jelenséget – a videokamerás károsodás-megfigyelések és a deformáció-feszültség összefüggések elemzése szerint – a három- és négyponthasított hajlítóvizsgálati próbatestek nem azonos nyúlásszinten bekövetkező tönkremenetele magyarázza. [OTKA_Közl.: 30,38]

(4) A laminált kompozit próbatestek húzóvizsgálatánál ugyancsak a próbatest szélességének hatását vizsgáltuk. A tönkremeneteli folyamat időbeli lefolyásának jellemzéséhez akusztikus emissziós (AE) eljárást és CCD kamerát használtunk. A CCD kamerát a tönkremeneteli folyamat rögzítésére (képek felvétele) és nyúlásmérésre használtuk fel. A hosszirányú nyúlásból és a képek értékeléséből a keresztirányú nyúlást határoztuk meg. Az eredmények a hajlításhoz hasonlóan méret- és irányfüggő hatásokat mutattak. A szálirányban kivágott próbatestek tönkremenetelét a szálszakadás, ferdeszálas esetben a szálkicsúszás és szálszakadás jellemezte. [OTKA_Közl.: 38]

(5) Rovingok, szálpaplan és szálpaplannal erősített kompozit minták, mint beágyazatlan, illetve beágyazott szálfolyamok és szálkötegek szakadási folyamatát szakítóvizsgálatuk során tanulmányoztuk. Kimutatható volt, hogy az emulziókötésű szálpaplanokból vett rovingmintákban a szálszilárdság kihasználása jelentősen nagyobb, mint a lazább, poros kötésű szálpaplanok roving-darabjaiban. Ez arra mutatott, amit SEM felvételek meg is erősítettek, hogy az emulziós kötőanyag jobb kötést, együttműködést hozott létre a rovingok elemi szálai között, mint a poros. [OTKA_Közl.: 41,47]

(6) A termoplasztikus mátrixú kompozitok elővizsgálatként, fröccsöntött PP próbatestek időfüggő mechanikai viselkedését tanulmányoztuk és elemeztük a mért relaxációs- és nyúlásvezérelt szakítógörbék, illetve a kúszás- és erővezérelt szakítógörbék közötti kapcsolatot. A vizsgálatok kimutatták, hogy a gyakorlatban is alkalmazható a mért rövidtávú szakítógörbékkel való hosszútávú viselkedés, azaz a feszültségrelaxációs, illetve kúszásgörbék kidolgozott becslési eljárása. [OTKA_Közl.: 28, 32, 37,43,44]

(7) A különböző típusú, de azonos területi sűrűségű, egy- és többrétegű üvegszálpaplan laminátumok CCD- kamerás és szkennelt felvételeinek képfeldolgozó programmal történt elemzése és az átmenő (vetületi) pórusok meghatározása kimutatta, hogy a statisztikus szálpaplan modell pórusméreteloszlása jó alkalmazható a mért beírt körös és teljes pórusméretek eloszlásának leírására. Ennek révén kimutatható volt, hogy a poros kötés esetén kisebb pórusméretek adódnak. [OTKA_Közl.:6,8,17,26]

(8) A pórusméretek és a folyadékfelszívás témaköréhez kapcsolódva végeztük el az üvegszálpaplanok lapra merőleges légáteresztési és buborékos maximális pórusméret meghatározási vizsgálatát, amit különböző rétegszámok mellett hajtottunk végre. A mérések révén kapott maximális pórusméretek a várakozásnak megfelelően a képfeldolgozással kapott pórusméreteloszlások felső, kis valószínűségű tartományába estek, míg a légáteresztési tényezők alakulása megerősítették az azonos területi sűrűségű, de emulziós kötés miatt tömörebb rovingdarabokból felépülő szálpaplanok nagyobb áteresztő képességét [OTKA_Közl.: 35,36].

(9) A gyantafelvételi folyamat függ a térhálósodás lefolyásától is, amit pedig elsősorban a környezeti hőmérséklet és a térhálósító adalék mennyisége határoz meg. Ennek vizsgálatára kísérleteket végeztünk a gyantafelvétel környezeti hőmérséklettől való függésének és a gélesedési pont meghatározására, valamint és a kialakult gyanta mechanikai tulajdonságainak feltárására, és meghatároztuk a legkedvezőbb körülményeket biztosító paraméter tartományokat. [OTKA_Közl.: 23, 25,27, Gombos Z. 2009-ben védendő PhD dolgozata]

(10) A Lucas-Washburn egyenlet közelítő explicit megoldását sikerrel alkalmaztuk poliészter fonalköteg vízfelvételi, függőleges helyzetű üvegszálpaplan minta lapmenti víz- és gyantafelvételi, üvegszálpaplan lapra merőleges gyantafelvételi, továbbá laminált

üvegszálpaplan rétegek injektoros szerszámban történő gyantafelvételi folyamatának leírására is. [OTKAKözl. 6,7,15,20, Gombos Z. 2009-ben védendő PhD dolgozata]

A közelítő explicit megoldás jól volt használható gyanták és gyanta mátrixú kompozitok kapilláris és diffúziós vízfelvételének együttes mennyiségi leírására is. [OTKAKözl. 10,15] Ez utóbbit Czél G. munkatárs is hasznosította a 2009. évben védendő PhD dolgozatában.

(11) Megvizsgáltuk az üvegszálpaplan erősítésű kompozit lapok irány- és rétegszám, valamint az injektoros szerszámmal való gyártás esetén a nyomáskülönbség, a térhálósító adalék mennyisége, valamint a kitöltési idő hatását a mechanikai tulajdonságokra és meghatároztuk a legkedvezőbb beállítási tartományokat. [OTKAKözl. 24, Gombos Z. 2009-ben védendő PhD dolgozata]

(12) Az elektrosztatikus szövetékképzéssel előállított PVA nanoszálak szerkezet és annak újszerű, orientált változatának SEM felvételes és képfeldolgozós vizsgálata kimutatta, hogy az eredetileg a szálpaplanhoz hasonló struktúra egy lényegesen egytengelyű irányítotttságot kapott, ami a szilárdság irányfüggésében is kifejeződik. Ez alapot adhat nanoszálak fonalak, illetve erősítő szerkezetek előállítására. [OTKAKözl. 42, Molnár K. 2009-ben kezdődő PhD témája]

3.3. AZ ÉRTEKEZÉS TÉMÁJÁBAN SZÜLETETT PUBLIKÁCIÓK

3.3.1. Az értekezés témájában született olyan publikációk, amelyek szerzői között a kutatás munkatársai szerepelnek

Ezeket a *Zárójelentés közlemények* c. lista foglalja össze, amelyekre pl. az [OTKAKözl. 42] formában hivatkozunk.

3.3.2. Az értekezés témájában született, illetve kapcsolódó disszertációk

OTKA kutatáson belül született disszertációk

- D1. Nagy V.: Examination and Modeling of Porosity in Polyester Twisted Fibrous Structures. PhD Thesis. BME, Budapest 2006.
- D2. Rácz Zs.: Egyirányban erősített kompozit rudak hajlító karakterisztikájának és tönkremeneteli folyamatának elemzése. PhD értekezés. BME, Budapest 2006.
- D3. Nagy P.: Polimerek időfüggő mechanikai jellemzői, összefüggéseik elméleti és kísérleti elemzése. PhD értekezés. BME, Budapest 2007.
- D4. Vas L.M.: Idealizált statisztikus szálkötegcellák és alkalmazásuk szálas szerkezetek, kompozitok modellezésére. MTA doktori értekezés. Budapest 2007. (Sikeresen védve: 2008. májusában)
- D5. Simon Z.L.: Laminált kompozit lapok feszültség, deformációs mechanizmusának elemzése, különös tekintettel a méret és szerkezethatásokra. PhD értekezés. BME, Budapest 2008.
- D6. Gombos Z.: Üvegszálpaplan szerkezete, befolyása a gyantafelvételi folyamatra és a kompozit jellemzőire. PhD értekezés. BME, Budapest 2009. (Munkahelyi vita: 2009. április)

OTKA kutatáshoz kapcsolódó disszertációk

- D7. Czigány T.: Bazaltszálas hibridkompozitok. MTA Doktori disszertáció, Budapest 2004. (Sikeresen védve: 2005. májusában)
- D8. Zsigmond B.: Modeling of Braided Reinforced Composites Crosslinked by Electron Beam. PhD Thesis. BME, Budapest 2005.

- D9. Pölöskei K.: A szálgyártás során keletkező bazaltszálfejek hatása a polimer kompozitok mechanikai tulajdonságaira. PhD értekezés. BME, Budapest 2006.
- D10. Ronkay F.: PET palackok anyagának fizikai újrahasznosítása. PhD értekezés. BME, Budapest 2007.
- D11. Kocsis Z.: Farosttal erősített polimer kompozitok fejlesztése. PhD értekezés. BME, Budapest 2008.
- D12. Czél G.: Tojásslévényű kompozit csatornacsövek elemzése, méretezési elvei. PhD értekezés. BME, Budapest. Munkahelyi vita 2009 tavaszán.

3.3.3. Az értekezés témájában született, illetve kapcsolódó TDK dolgozatok

OTKA kutatáson belül született TDK dolgozatok

- TDK1. Gombos Zoltán: Üvegszálapalakok pórusméretének és gyantafelvételének vizsgálata. OTDK, Műszaki Tudományi Szekció, Gödöllő 2005. márc. 21-23.
- TDK2. Meggyes Gábor: Üvegszövet és vele erősített kompozit lapok szakító vizsgálata és a befogási hossz, kivágási irány, illetve a próbatest szélesség befolyásának elemzése. BME TDK Konferencia, 2005. nov. 11.
- TDK3. Várza Ferenc: Kétdimenziós üvegszálak erősítőanyagok gyantafelvételi folyamatának elemzése különböző viszkozitású tartományokban. BME TDK Konferencia, 2005. nov. 11.
- TDK4. Török Péter: Poliészter gyanta különböző iniciálási hőmérséklete és mechanikai tulajdonságai közti összefüggés elemzése. BME TDK Konferencia, 2005. nov. 11.
- TDK5. Kaló András: Vákuuminjektált kompozit lapok hajlító tulajdonságainak elemzése. BME TDK Konferencia, 2005. nov. 11.
- TDK6. Hochrein Tamás: Réteges kompozit lapok húzó-tulajdonságainak elemzése. BME TDK Konferencia, 2005. nov. 11.
- TDK7. Tóth Béla: Üvegszálapalakok pórusainak és légáteresztő képességének vizsgálata. BME TDK Konferencia, 2006. nov. 17. (III. díj)
- TDK8. Molnár Kolos: Üvegszál, szálköteg, szálapalak szakítóvizsgálata és modellezése. BME TDK Konferencia, 2006. nov. 17. (I. díj)
- TDK9. Molnár Kolos: Üvegszálak, szálkötegek és szálapalakok szilárdsági tulajdonságainak vizsgálata. BME TDK Konferencia, 2007. nov. 16. (I. díj)
- TDK10. Molnár Kolos: PVA nanoszálak előállítása electrospinning eljárással, az előállítási paraméterek hatása a keletkezett szálak szerkezet geometriai jellemzőire. BME TDK Konferencia, 2007. nov. 16. (I. díj, Rektori különdíj)
- TDK11. Horváth Péter: Üvegszálak erősítőanyagok RTM szerszámban történő kitöltésének vizsgálata. BME TDK Konferencia, 2008. nov. 19. (III. díj)
- TDK12. Bakonyi Péter: Polipropilén kúszási tulajdonságainak vizsgálata a terhelőerő és a hőmérséklet függvényében. BME TDK Konferencia, 2008. nov. 19. (II. díj)

OTKA kutatáshoz kapcsolódó TDK dolgozatok

- TDK13. Kmetty Ákos: RTP (Rapid Prototyping) termékek utókezelésének vizsgálata a légáteresztő képesség meghatározásával. BME TDK Konferencia, 2007. nov. 16. (III. díj)

3.3.4. Az értekezés témájában született, illetve kapcsolódó diplomatervek

OTKA kutatáson belül született diplomatervek

- DT1. Gombos Zoltán: Üvegpaplan gyantafelvételi képességének elemzése. BME Diplomaterv, Budapest, 2005.

- DT2. Nagy Gergely: Kísérleti szerszámok tervezése injektálásos technológiákhoz. BME Diplomaterv, Budapest, 2005.
- DT3. Ócsai Ferenc: RTM és vákuuminjektáláshoz kísérleti munkaállomás tervezése. BME Diplomaterv, Budapest, 2005.
- DT4. Várza Ferenc: Kétdimenziós üvegszál erősítőanyagok gyantafelvételi folyamatának elemzése különböző viszkozitású tartományokban. BME Diplomaterv, Budapest, 2006.
- DT5. Gyivicsán Péter: Kétdimenziós erősítő szerkezetek pórusméretének vizsgálata a képfeldolgozás módszerével. BME Diplomaterv, Budapest, 2006. (TMTE és a Rejtő S. Pro T. Alapítvány a Könnyűiparért Nívódíj pályázatának II. díja)
- DT6. Török Péter: Poliészter gyanta különböző iniciálási hőmérséklete és mechanikai tulajdonsága közti összefüggés elemzése. BME Diplomaterv, Budapest, 2006.
- DT7. Zentai Gábor: Üvegszál kompozitok RTM módszerrel történő gyártásának az erősítőanyag folyadékáteresztő képessége alapján történő optimalálása. BME Diplomaterv, Budapest, 2008.
- DT8. Horváth Péter: Üvegszál erősítőanyagok RTM szerszámban történő kitöltésének vizsgálata. BME Diplomaterv, Budapest, 2008.
- DT9. Bakonyi Péter: Polipropilén kúszási viselkedésének becslése erőgerjesztésű szakítóvizsgálat alapján. BME Diplomaterv, Budapest, 2008.

OTKA kutatáshoz kapcsolódó diplomatervek

- DT10. Radnai Benjamin: Nagyszilárdságú fonatolt kötelek elemzése optimális szerkezet kialakításhoz. BME Diplomaterv, Budapest, 2006.